

ГОРКУНОВ Б. М., БОРИСЕНКО Е. А., ЛЬВОВ С. Г., ШИБАН ТАМЕР

ВЛИЯНИЕ МЕСТА РАСПОЛОЖЕНИЯ НАМАГНИЧИВАЮЩИХ ОБМОТОК ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НА ГАРМОНИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПОЛЯ

В данной работе рассмотрен первичный электромагнитный преобразователь с неоднородным зондирующим полем структура которого представлена в виде пространственно-периодических гармоник. Для исключения влияния на результат измерения высших гармоник и выделения необходимых информативных гармоник предложено несколько различных систем намагничивающих полюсов преобразователя что позволило выделять необходимые сочетания четных или нечетных гармоник выходного сигнала преобразователя и повысило точность многопараметрового контроля электрических, магнитных и геометрических параметров исследуемых изделий. Выполнен расчет и показано влияние высших гармоник поля на выходные сигналы в измерительных обмотках преобразователя.

Ключевые слова: вихреговой измерительный преобразователь, пространственно-периодическая структура поля, неразрушающий контроль, цилиндрические металлические изделия.

ГОРКУНОВ Б. М., БОРИСЕНКО Е. А., ЛЬВОВ С. Г., ШИБАН ТАМЕР

ВПЛИВ МІСЦЯ РОЗТАШУВАННЯ НАМАГНІЧУВАЛЬНИХ ОБМОТОК ПЕРЕТВОРЮВАЧА НА ГАРМОНІЧНИЙ СКЛАД ПОЛЯ

У даній роботі розглянуто первинний електромагнітний перетворювач з неоднорідним зондуємим полем структура якого представлена у вигляді просторово-періодичних гармонік. Для виключення впливу на результат вимірювання вищих гармонік і виділення необхідних інформативних гармонік запропоновано кілька різних систем намагнічуючих полюсів перетворювача, що дозволило виділяти необхідні поєднання парних або непарних гармонік вихідного сигналу перетворювача і підвищило точність багатопараметрового контролю електричних, магнітних і геометричних параметрів досліджуваних виробів. Виконано розрахунок і показано вплив вищих гармонік поля на вихідні сигнали в вимірювальних обмотках перетворювача.

Ключові слова: вихрострумний вимірювальний перетворювач, просторово-періодична структура поля, неруйнівний контроль, циліндричні металеві вироби.

B. GORKUNOV, Y. BORYSENKO, S. LVOV, SHAIKAN TAMER

THE INFLUENCE OF THE TRANSDUCER'S MAGNETIZING WINDINGS LOCATION ON THE HARMONIC COMPOSITION OF THE FIELD

In this paper, we consider a primary electromagnetic transducer with an inhomogeneous probe field whose structure is represented as spatially periodic harmonics. The number different systems of magnetizing poles of the transducer was proposed in order to eliminate the higher harmonics effect on the measurement result and to highlight the required informative harmonics. This made it possible to select necessary combinations of even or odd harmonics of the transducer's output signal and to increase the accuracy of the multi-parameter control of the products under study. It was performed calculation and the effect of the field higher harmonics on the output signal in the transducer's measuring windings was shown. It was proposed to estimate the value of the error caused by other harmonics elimination when calculating as the ratio of the first harmonic amplitude to the algebraic sum of the EMF of this eliminated and accounted harmonics. It was established that for a transducer with one exciting winding, elimination the third harmonic results in an error calculation of the resulting EMF of 5%, and the calculation error for a transducer with two exciting windings associated with elimination of the fifth harmonic is 1.5%.

Key words: eddy current measuring transducer, spatial-periodic field structure, non-destructive testing, cylindrical metal products.

Введение. В работах [1-3] описаны методы многопараметрового контроля электромагнитных и геометрических параметров цилиндрических токопроводящих изделий. Получены выражения, которые описывают характеристики магнитного поля нитевидного проводника с током, имеющего бесконечно малые поперечные размеры и размещённого вдоль образующей цилиндрического изделия, как показано на рис. 1. Основными недостатками такого электромагнитного преобразователя (ЭМП) есть сильное влияние высших гармоник на результат измерения амплитуд и фаз выделенных информативных гармоник.

На практике преимущественно используются проводники с конечной шириной и радиальной высотой. Последнее удобно реализовать в одном из двух конструктивных вариантах: использование ленточного проводника с током либо наборного полюса, содержащего множество тонких проводников с токами, текущими вдоль образующей цилиндра в одном и том же направлении. В последнем случае токи отдельных проводников создают суммарный ток полюса.

Выражения для нахождения распределения напряженности магнитного поля внутри и снаружи изделия для любого номера пространственных гармо-

© Б. М. Горкунов, Е. А. Борисенко, С. Г. Львов, Шибан Тамер, 2019

ник, как показано в [4, 5] имеют вид:

$$H_r(r, \varphi, t) = e^{i\omega t} \sum_n \frac{\sin(n\gamma)}{n\gamma} f_n(r) \sin(n\varphi); \quad (1)$$

$$H_\varphi(r, \varphi, t) = e^{i\omega t} \sum_n \frac{\sin(n\gamma)}{n\gamma} g_n(r) \cos(n\varphi); \quad (2)$$

где $f_n(r)$, $g_n(r)$ – функции, определяющие реакцию электромагнитного поля на исследуемое изделие.

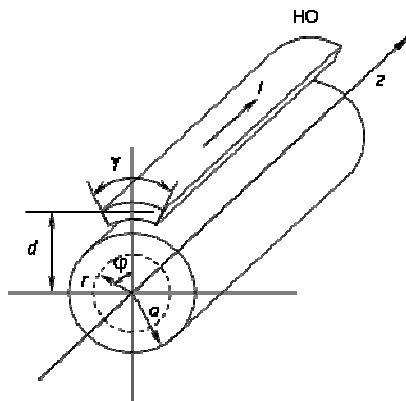


Рис. 1. Цилиндрический объект радиуса a в поле ЭМП с угловой шириной γ

Основная часть. Для исключения из картины пространственного распределения поля четных и нечетных гармоник можно использовать систему проводников с одинаковыми и чередующимися направлениями токов в них.

Причем, для сохранения определенной симметрии эти проводники удобно сдвигать друг относительно друга по азимуту на углы $\varphi = 2\pi/m$, где m – число проводников.

На рис. 2 показаны, сечения намагничивающих систем, состоящих из двух (а), трех (б) и четырех (в) ленточных проводников или полюсов с возбуждающими токами I одного и того же направления и равными по величине.

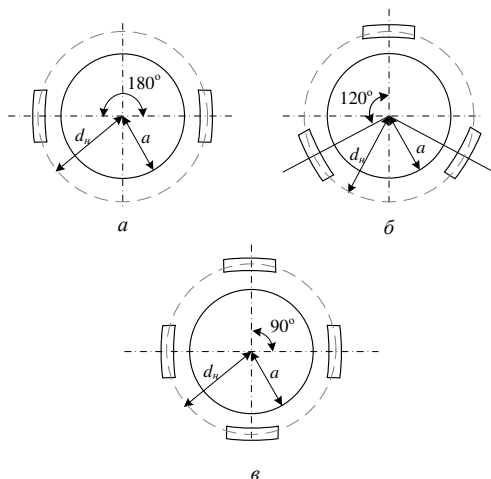


Рис. 2. Сечения намагничивающих систем с токами одного и того же направления и равными по величине

Электромагнитное поле m проводников с токами можно получить из выражений для поля одного проводника путем замены в (1) и (2) угловой координаты φ на $\varphi + (2\pi/m)k$, где $k = 1, 2, 3, \dots$ В таком случае по-

лученные формулы содержат двойные суммы.

Простое выражение для описания картины распределения полей в данном случае может быть найдено при использовании формулы суммирования, которая имеет вид:

$$\sum_{k=1}^{m-1} \sin \left[n \left(\varphi + \frac{2\pi}{m} k \right) \right] = m \sin(n\varphi), \quad (3)$$

где $n = pm$, $p = 0, 1, 2, \dots$

При $n \neq pm$ левая часть выражения (3) обращается в нуль. Аналогичный вид имеет формула суммирования для косинусов.

Используя формулу (3), приведем, к примеру, выражение для радиальной компоненты напряженности поля в системе с одинаковыми направлениями токов:

$$H_r(r, \varphi, t) = e^{i\omega t} m \sum_{p=1}^{\infty} \frac{\sin(n\gamma)}{n\gamma} f_n(r, i, \omega) \sin(n\varphi). \quad (4)$$

Из (4) следует, что амплитуда поля m проводников с одинаковым направлением токов в m раз больше амплитуды поля одного проводника.

Отметим, что H_r компонента в данном случае содержит только гармоники, кратные числу проводников.

Например, если рассматривается система из двух проводников (см. рис. 2, а), то магнитное поле складывается из четных гармоник, а при $m = 3$ (см. рис. 2, б), поле содержит третью, шестую, девятую и т.д. гармоники.

На рис. 3 представлены сечения намагничивающих систем содержащих два (а), четыре (б) и шесть (в) проводников с равными по величине и чередующимися по направлению токами в них.

Знаки «+» и «-» указывают направления токов I вдоль и против направления оси z .

Поле m пар проводников с чередующимися направлениями токов в них (см. рис. 3) найдем, воспользовавшись формулой суммирования (3). При этом, после некоторых преобразований, получим выражение для радиальной компоненты поля:

$$H_r(r, \varphi, t) = 2m e^{i\omega t} \sum_{p=0}^{\infty} \frac{\sin(n\gamma)}{n\gamma} f_n(r, i, \omega) \sin(n\varphi), \quad (5)$$

где $n = (2p + 1)$, m – число пар проводников.

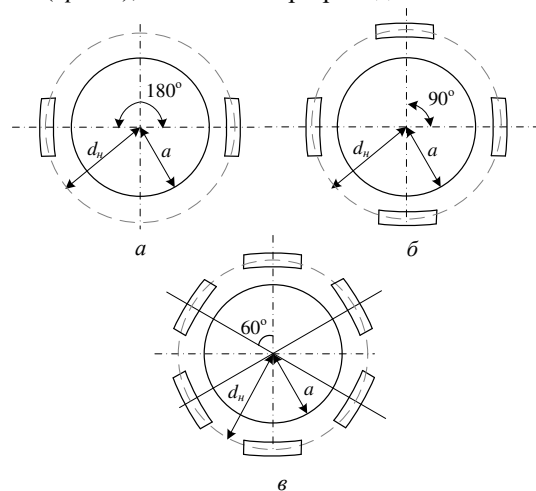


Рис. 3. Сечения намагничивающих систем с равными по величине и чередующимися направлениями токов в них

Как видно из (5), амплитуда поля m пар проводников с чередующимися направлениями токов больше в $2m$ раз амплитуды поля одного проводника. При этом H_r компонента магнитного поля в данном случае включает в себя гармоники, кратные числу пар проводников.

Например, при одной паре проводников (см. рис. 3, а), описываемое магнитное поле (5), содержит

только нечетные гармоники: первую, третью, пятую и т.д. При числе пар $m = 2$ (рис. 3, б) – только четные гармоники: вторую, шестую, десятую и т.д.

На рис. 4 а – и показаны способы получения специальных намагничивающих систем на основе сочетания двух возбуждающих обмоток с определенными размещениями проводников и направлениями токов в них.

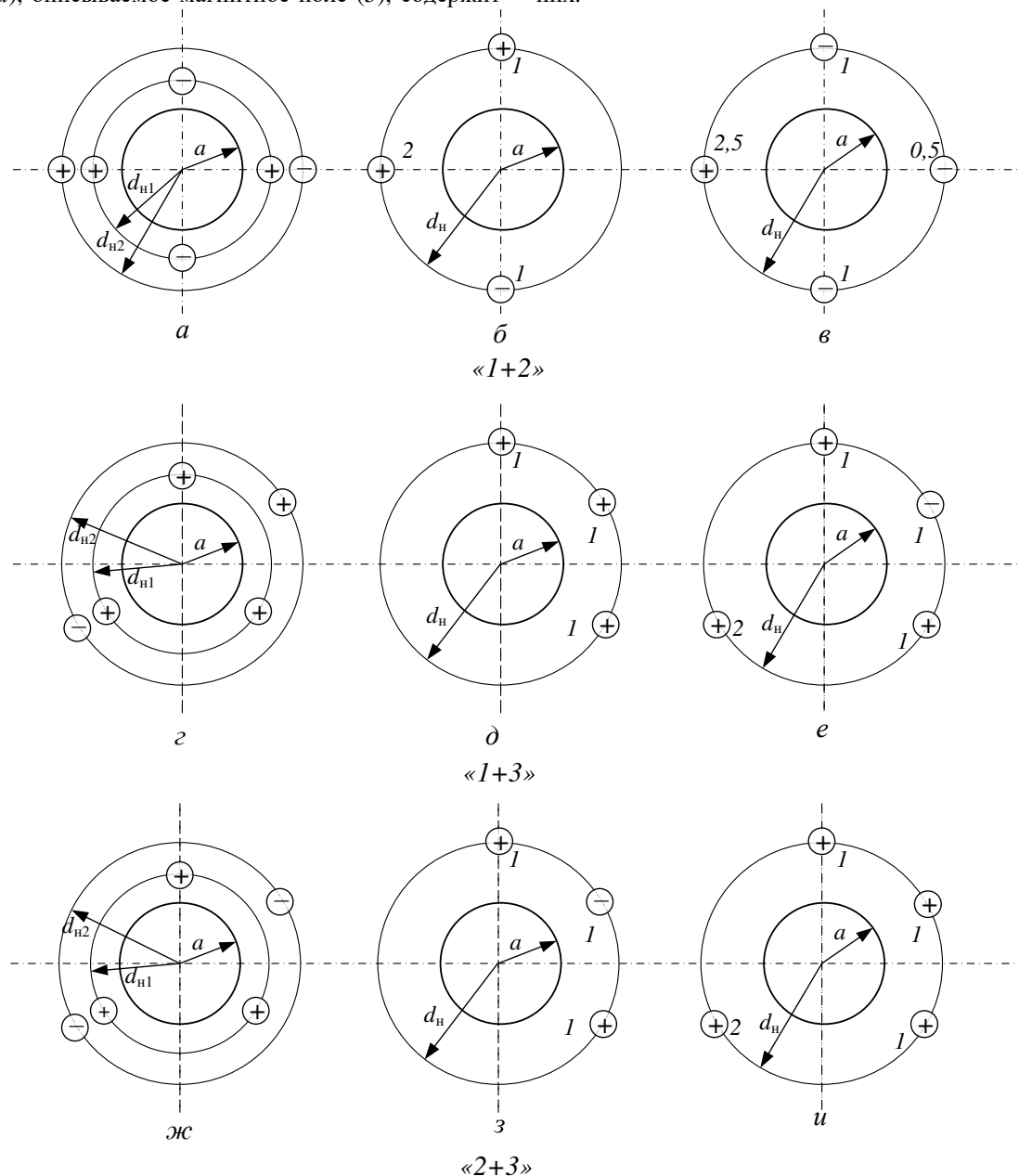


Рис. 4. Различные комбинации намагничивающих систем преобразователей с требуемой суммой преобладающих пространственных гармоник зондирующего поля.

Используя комбинации отдельных намагничивающих систем с чередующимися и однонаправленными токами в проводниках можно выделить сумму двух требуемых преобладающих пространственных гармоник.

На рис. 4 а, г, ж показаны пары возбуждающих обмоток расположенных на разных близких друг к другу радиусах a_{n1} и a_{n2} . Причем, к примеру, обмотка, имеющая радиус a_{n2} , создает поле (см. рис. 4 а) с пре-

обладающей 1-й пространственной гармоникой, а обмотка, размещенная на радиусе a_{n1} , возбуждает поле с преимущественной 2-й гармоникой.

Отсюда следует, что на рис. 4 а – в показанные комбинации двух обмоток образует намагничивающую систему, условно названную "1+2".

Из рис. 4 б, в видно, что такая система существенно упрощается по сравнению с исходной (см. рис.

4 а), поскольку она размещается на одном радиусе a_n и имеет меньше проводников.

Цифры, указанные на рис. 4 б, в, д, е, з, и характеризуют отношение тока в обмотке, расположенной на радиусе a_{n2} , к току в обмотке с радиусом a_{n1} .

Например, если использовать одинаковые по величине токи в обмотках, то в системе "1+2" можно обойтись всего тремя полюсами (см. рис. 4, б), правда, в одном из них число ампер-витков должно быть в 2 раза больше, чем в остальных.

Представленные на рис. 4 комбинации намагничивающих систем позволяют регулировать величины амплитуд соответствующих пространственных гармоник за счет изменения токов в обмотках и размещения полюсов указанным образом.

К примеру, в системе "1+2" при отношении токов в обмотках, не равном 1, возникает необходимость использования 4-х полюсов с различными ампер-витками в них (см. рис. 4 в, соответствующий отношению токов, равному 1,5).

На рис. 4 г, д, е и рис. 4 ж, з, и показаны комбинации намагничивающих систем на основе суперпозиции преобладающих 1-й и 3-й ("1+3"), 2-й и 3-й ("2+3") пространственных гармоник с возможностью регулирования их амплитуд. Как видно из этих рисунков, данные комбинации осуществляются аналогично комбинациям системы "1+2".

Случаи, показанные на рис. 4 д и рис. 4 з соответствуют отношениям токов в обмотках, равным 1 (при направлениях токов, в полюсах, указанных на рис. 4 г и рис. 4 ж). Намагничивающие системы "1+3" и "2+3", представленные на рис. 4 е и рис. 4 и получены при смене на обратные направления токов в полюсах, размещенных на радиусах a_{n2} (отношения токов в обмотках равно 1).

Данные намагничивающие системы при наличии регулирования величины токов такой полярности позволяют получить усиление амплитуд 1-й и 3-й (см. рис. 4 е) и 2-й и 3-й (см. рис. 4 и) пространственных гармоник магнитного поля.

При измерении параметров исследуемых изделий одним из главных вопросов является определение способов и средств выделения требуемых гармоник из результирующих сигналов преобразователя и ослабления влияния на результаты контроля гармоник с более высокими номерами, чем номера требуемых.

Отметим здесь основные пути подавления амплитуд мешающих пространственных гармоник:

- размещение секций измерительных обмоток на радиусах, меньших радиусов намагничивающих полюсов;

- рациональный выбор числа полюсов с однонаправленными токами в них ($m \geq 2$, см. рис. 2 а – в) и числа пар полюсов с противоположно направленными токами ($m \geq 1$, см. рис. 3 а – в);

- увеличение угловой ширины возбуждающих полюсов;

- размещение секций измерительных обмоток на определенных лучах $\varphi = \text{const}$ и соответствующее включение таких секций;

- выбор угловой ширины секций измерительной обмотки.

К примеру, для преобразователя, имеющего два полюса с токами противоположных направлений (см. рис. 3 а), при $\gamma = 36^\circ$ и $d/a = 0,5$ влияние 5-й мешающей пространственной гармоники на выделяемые 1-ю и 3-ю равно нулю, а 7-й на 1-ю и 3-ю составляет соответственно 0,36% и 2,7%. Воздействие 7-й гармоники на 3-ю можно уменьшить до 1%, если принять $d/a = 0,4$.

Для преобразователя с двумя полюсами, по которым протекают однонаправленные токи (см. рис. 2 в) при $\gamma = 30^\circ$ и $d/a = 0,5$ отсутствует влияние 6-й гармоники на выделяемые 2-ю и 4-ю, а воздействие 8-й на 2-ю и 4-ю составляет 0,4% и 3,1%. При выборе $d/a = 0,4$ последнюю цифру можно уменьшить до 1,3%.

Выводы. В настоящей статье предложено использовать систему проводников с одинаковыми и чередующимися направлениями токов в них для исключения из картины пространственного распределения поля четных или нечетных гармоник. Причем используя комбинации отдельных намагничивающих систем с чередующимися и однонаправленными токами в проводниках можно выделить сумму двух требуемых преобладающих пространственных гармоник. Показано, что для сохранения определенной симметрии эти проводники удобно сдвигать друг относительно друга по азимуту на углы $\varphi = 2\pi/m$, где m – число проводников.

Выполнен расчет и показано влияние высших гармоник поля на выходные сигналы в измерительных обмотках преобразователя. Значение погрешности, связанной с не учётом при вычислениях остальных гармоник оценивалась по отношению амплитуды первой отбрасываемой гармоники к алгебраической сумме ЭДС этой отбрасываемой и учитываемых гармоник. Так, например, для преобразователя с одним возбуждающим проводником, отбрасывание третьей гармоники приведет к погрешности расчета результирующей ЭДС, равной 5%, а погрешность расчета для преобразователя с двумя возбуждающими проводниками, связанная с отбрасыванием, к примеру, пятой гармоники при определении результирующей ЭДС, составляет 1,5%.

Список литературы

1. Сухоруков В.В. Неразрушающий контроль. В 5 кн. Кн. 3. Электромагнитный контроль. -М.: Высшая школа, 1992.- 312 с.
2. Gorkunov, B.M., Lvov, S.G. Borisenko, Y.A. Uncertainty estimation while proceeding multi-parameter eddy current testing // Information Processing Systems, Vol. 4(155), pp. 92-97. <https://doi.org/10.30748/soi.2018.155.12>.
3. Горкунов Б. М., Львов С. Г., Борисенко Е. А., Шибан Тамер. Нормированные функции вихретоковых измерительных преобразователей с пространственно-периодической структурой поля при многопараметровом контроле металлических изделий // Украинский метрологический журнал, Харьков. – № 3. – 2018. – С. 28–35.
4. Горкунов Б. М., Тюпа И. В. Вихретоковый двухпараметровый контроль ферромагнитных цилиндрических изделий // Вестник НТУ "ХПИ", Харьков. – № 5. – 2004. – С. 93–99.
5. Б.М. Горкунов, А.А. Тищенко, И.Б. Горкунова. Многопараметровый электромагнитный контроль токопроводов в пространственнопериодических полях // Актуальні проблеми автоматизації і приладобудування. – Х: НТУ"ХПІ". – 2014. – С. 39-40.

References (transliterated)

1. Suhorukov V.V. Nerazrushayushiy kontrol. V 5 kn. Kn. 3. Elektromagnitnyy kontrol. -M.: Vysshaya shkola, 1992.- 312 s.
2. Gorkunov, B.M., Lvov, S.G. Borisenko, Y.A. Uncertainty estimation while proceeding multi-parameter eddy current testing. Information Processing Systems, Vol. 4(155), pp. 92-97. <https://doi.org/10.30748/soi.2018.155.12>.
3. Gorkunov B. M., Lvov S. G., Borisenko E. A., Shiban Tamer. Normirovannyye funktsii vihetokovyih izmeritelnyih preobrazovateley s prostanstvenno-periodicheskoy strukturoy po-lya pri mnogoparametrovom kontrole metallicheskih izdeliy. Ukrainskiy metrologicheskyy zhurnal, Harkov. – 3. – 2018. – P. 28–35.
4. Gorkunov B. M., Tyupa I. V. Vihretokovyyi dvuhparametrovyy kontrol ferromagnitnyih tsilindricheskikh izdeliy. Vesnik NTU "HPI", Harkov. – 5. – 2004. – P. 93–99.
5. B. M. Gorkunov, A. A. Tischenko, I. B. Gorkunova. Mnogoparametrovyy elektromagnitnyy kontrol tokoprovodov v prostanstvenno-periodicheskikh polyah. Aktualni problemi avtomatiki i priladobuduvannya. – H: NTU "HPI". – 2014. – P. 39-40.

Поступила (received) 11.01.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Горкунов Борис Митрофанович (Горкунов Борис Митрофанович, Gorkunov Borys Mytrofanovych) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри інформаційно-вимірювальних технологій і систем; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8175-858X>; e-mail: gorkunov@kpi.kharkov.ua

Борисенко Євген Анатолійович (Борисенко Евгений Анатольевич, Borysenko Yevhen Anatoliiovych) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри інформаційно-вимірювальних технологій і систем; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7511-2590>; e-mail: 4borisea@gmail.com.

Львов Сергій Геннадійович (Львов Сергей Геннадьевич, Lvov Sergii Gennadiiovych) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри інформаційно-вимірювальних технологій і систем; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3830-0570>; e-mail: sgl8ntu@gmail.com.

Шибан Тамер (Шибан Тамер, Shaiban Tamer) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант кафедри інформаційно-вимірювальних технологій і систем; м. Харків, Україна;